



Dr hab. Adam Kozela
tel. 12 6628290
NZ24 IFJ PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Bogumiła Zalewskiego
pt. „Interaction of ${}^6\text{He}$ with hydrogen isotopes
at 26 MeV/n energy”

Rozprawa doktorska magistra Bogumiła Zalewskiego została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Warszawskiego w marcu 2024 roku. Jest napisana w języku angielskim, składa się z czterech rozdziałów, dwóch appendiksów, liczy 105 stron. Jej tematem jest oddziaływanie niestabilnego izotopu ${}^6\text{He}$ z jądrami wodoru oraz deuteru. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. Krzysztof Rusek.

Praca prezentuje rezultaty trzech pomiarów wykonanych w centrum Badań Jądrowych w Dubnej z wykorzystaniem wiązki wtórnej izotopu ${}^6\text{He}$ o energii 26 MeV/n wyprodukowanej na tarczy berylowej za pomocą cyklotronu U400M oraz spektrometru-separatora Acculinna-2. Badane reakcje układają się w logiczny ciąg rosnącej złożoności procesu, przechodząc od rozpraszania elastycznego ${}^6\text{He}$ -proton oraz ${}^6\text{He}$ -deuteron do reakcji transferu neutronu pomiędzy deuteronem a helem-6. Zastosowanie odwrotnej kinematyki oraz pozycyjnie czułych detektorów o stosunkowo dużej powierzchni pozwoliło pokryć duży zakres kąta rozproszenia, który w układzie środka masy wynosił odpowiednio dla obu procesów elastycznych 25-120 stopni oraz 20-75 stopni dla reakcji transferu. Dobór reakcji nie jest przypadkowy gdyż pozwolił zastosować wyniki z rozpraszania elastycznego do finalnego opisu reakcji transferu przy pomocy odpowiednio dopasowanych potencjałów. Eksperyment był pierwszym fizycznym pomiarem wykonanym z wykorzystaniem separatora ACCULINNA-2, stanowił też pierwszy pomiar reakcji rozpraszania elastycznego ${}^6\text{He}$ -deuteron oraz reakcji transferu neutronu pomiędzy deuteronem a helem-6 w reakcji $d({}^6\text{He}, {}^5\text{He})t$.

Praca ma standardową konstrukcję, bardzo dobrze dopasowaną do omawianego materiału. Po krótkim i rzeczowym przedstawieniu całego jej zakresu, w rozdziale pierwszym Autor prezentuje podstawy teorii rozpraszania jąder, koncentrując się na opisie rozpraszania elastycznego przy pomocy Modelu Optycznego oraz rozpraszania na jądrze złożonym z dwóch klastrów. Przybliżenie DWBA zastało użyte do opisu reakcji transferu neutronu pomiędzy helem-6 a deuteronem, przy zastosowaniu potencjałów uzyskanych metodą foldingu tak w kanale wejściowym jak i wyjściowym. Rozdział ten, podobnie zresztą jak cała praca, napisany jest językiem bardzo oszczędnym, można by rzec

minimalistycznym, a zakres przedstawionych zagadnień precyzyjnie odpowiada zastosowanemu do analizy wyników eksperymentu zakresowi teorii.

W rozdziale drugim zapoznajemy się ze szczegółami technicznymi eksperymentu. Rozdział ten zawiera wyczerpujący opis użytych detektorów, układu trygera, ale też sposobu działania separatora fragmentów ACCULINNA-2 umożliwiającego uzyskanie tak egzotycznej wiązki. Całość jest ilustrowana grafikami i pozwala bardzo dobrze wyobrazić sobie pomiar. Zauważyłem tu drobne pomieszanie anod z katodami w tekście na stronie 27. Jest to ewidentny chochlik drukarski, bo we wszystkich innych miejscach opisu działania komór proporcjonalnych identyfikacja elektrod jest prawidłowa. Autor nie wspomina nigdzie o umieszczeniu całego układu detekcyjnego w próżni. Jest to drobne niedopatrzenie, wynikające najpewniej z oczywistości tego faktu.

Rozdział trzeci prezentuje szczegóły analizy zebranych danych. Można w niej wyodrębnić parę ważniejszych etapów: redukcja danych surowych, kalibracja detektorów, identyfikacja cząstek oraz różnych kanałów reakcji, wyliczenie wydajności. Kalibrację energetyczną Autor wykonał korzystając ze źródła Radonu-226, oraz energii wiązki, odpowiednio dla detektora krzemowego i scyntylatora NaJ(Tl). Autor zastosował przybliżenie liniowe zależności odpowiedzi detektora od energii, ale zadbał o uwzględnienie efektu od warstw martwych przed detektorem. Docenić należy dbałość w wyznaczaniu pozycji komór proporcjonalnych zastosowanych do rekonstrukcji wektora pędu jądra helu-6, bezpośrednio przekładającą się na dokładność wyznaczenia kątów reakcji.

Do identyfikacji cząstek zastosowano metodę bazującą na wyznaczeniu strat energii jako funkcji energii oraz ładunku cząstki. Na bardzo dobrą separację izotopów helu wpłynął brak stabilnych izotopów o liczbie masowej 5 i 7. Ze względu na małą energię protonów i deuteronów z rozpraszania elastycznego, do ich identyfikacji magister Zalewski wykorzystał relacje katowe, narzucone dwuciałową kinematyką tego procesu. Z uwagi na prawie natychmiastowy rozpad izotopu helu-5 metody tej nie można było zastosować do identyfikacji reakcji transferu. W tym przypadku Autor użył zasad zachowania energii i pędu do zdarzeń ze zidentyfikowanymi cząstkami alfa w prawym i trytonami w lewym detektorze. Ostatecznie, wybór badanej reakcji transferu umożliwiło zastosowanie warunku na masę brakującą, która powinna odpowiadać masie spoczynkowej neutronu. Wybór zdarzeń odpowiadających badanym procesom był najistotniejszym czynnikiem redukcji danych, odpowiadającym za usunięcie ponad 99% ich całkowitego wolumenu.

Wydajność całego procesu została określona metodą symulacji Monte-Carlo, wykonanych z użyciem pakietu GEANT. Metoda ta, poza uwzględnieniem złożonej geometrii pomiaru, pozwala na prawidłowe określenie efektu pochodzącego od granulacji zastosowanych detektorów. Dysponując ilością zarejestrowanych jąder ${}^6\text{He}$ oraz zdarzeń zebranych w funkcji kąta rozproszenia, wydajnością detekcji i wreszcie grubością tarczy Autor był w stanie wyliczyć różniczkowe przekroje czynne na badane reakcje.

W przypadku elastycznego rozpraszania ${}^6\text{He}$ na protonach otrzymane przekroje są w dobrej zgodności z istniejącymi pomiarami tej obserwabli dla zbliżonej energii. Fakt ten podnosi wiarygodność pierwszych w skali światowej wyników dla rozpraszania ${}^6\text{He}$ na deuteronie i dla reakcji transferu neutronu pomiędzy deuteronem a helem-6 w reakcji $d({}^6\text{He}, {}^5\text{He})t$.

W rozdziale czwartym Autor podejmuje próbę opisu uzyskanych różniczkowych przekroi czynnych za pomocą wprowadzonych we wstępie teoretycznym modeli. Okazuje się, że dla reakcji rozpraszania elastycznego $p(^6\text{He}, ^6\text{He})p$ opis ten jest całkiem dobry, choć zgodność poprawia się jeszcze po uwolnieniu i dofitowaniu kluczowych parametrów modelu, osiągając wartość zredukowanego χ^2 na poziomie 1.

Równie dobrą zgodność z dofitowanym do danych modelem optycznym Autor prezentuje dla reakcji rozpraszania elastycznego $d(^6\text{He}, ^6\text{He})d$. W przypadku opisu tej reakcji metodą foldingu ze złożenia potencjału proton- ^6He z funkcją falową deuteronu sytuacja jest nieco bardziej skomplikowana. Autor najpierw pokazuje, że wyniki praktycznie nie zależą od domieszki fali d do funkcji falowej deuteronu, a następnie używa dwóch potencjałów dofitowanych w pierwszym kroku dla reakcji $p(^6\text{He}, ^6\text{He})p$ do opisu rozpraszania elastycznego ^6He na deuteronach z zastosowaniem formalizmu foldingu. Oba potencjały dają porównywalne wyniki, nieznacznie gorsze od fitu Modelem Optycznym, jednak istotnie lepsze od zastosowania globalnego potencjału optycznego, bazującego na zestawie danych nie obejmującym badanej w pierwszym kroku reakcji, na co słusznie zwraca uwagę Autor dysertacji.

Ostatnim krokiem analizy jest opis reakcji transferu neutronu $d(^6\text{He}, ^5\text{He})t$ przy pomocy formalizmu Distorted Wave Born Approximation (DWBA). Tutaj Autor zastosował wiedzę zdobytą z przedstawionej wcześniej analizy kanałów elastycznych do opisu kanału wejściowego reakcji, podczas gdy kanał wyjściowy opisał globalnym potencjałem optycznym oraz potencjałem uzyskanym ze złożenia rozpraszania trytu osobno na neutronie i cząstce alfa. Takie podejście pozwoliło na dopasowanie czynników i amplitud spektroskopowych dla układu $n+^5\text{He}$, które w ramach błędu, są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi. Do opisu danych Autor zastosował odpowiednio trzy i dwa różne potencjały dla kanału wejściowego i wyjściowego. To dość mocno skomplikowało konstrukcję pracy, a podobne nazewnictwo potencjałów trochę utrudniało jej rozumienie. Jednak z drugiej strony umożliwiło to wyciągnięcie istotnego wniosku o słabej zależności opisu reakcji transferu $d(^6\text{He}, ^5\text{He})t$ od wyboru potencjału.

Pracę zamykają dwa appendiksy, z których jeden zawiera stabularyzowane wyniki zmierzonych różniczkowych przekroi czynnych, a drugi opisuje pomiar efektywnych grubości tarcz: protonowej i deuteronowej. Pomiar ten przeprowadzono w dedykowanym eksperymencie z wykorzystaniem dodatkowej tarczy gazowej o dobrze określonej grubości. Był on kluczowy dla wyznaczenia absolutnych wartości różniczkowych przekroi czynnych na taczach polietylenowych, pozwalając wyznaczyć ich efektywną grubość.

Dysertację magistra Zalewskiego przeczytałem z dużą przyjemnością i uważam za bardzo udaną. Jest napisana bardzo dobrym językiem angielskim, z naciskiem na prostotę konstrukcji, co bardzo ułatwia jej czytanie. Znalezienie błędu jest prawdziwym wyzwaniem, a te nieliczne są po prostu natury edytorskiej. Praca jest znakomitym podsumowaniem udanego eksperymentu, który świetnie wpisuje się i uzupełnia obecny stan wiedzy w dziedzinie, której dotyczy. Strona graficzna pracy prezentuje się także dobrze: liczne rysunki wraz z bogatą literaturą (93 pozycje), znakomicie ułatwiają czytelnikowi zrozumienie prezentowanych treści. Autor zamieścił dwie grafiki z domeny publicznej (2.5 i 2.10), dbając przy tym o ich prawidłowe oznaczenie. Być może przygotowanie dedykowanego rysunku, bardziej odpowiadającego zastosowanemu urządzeniu byłoby bardziej na miejscu.

Z obowiązku recenzenta poniżej przytaczam parę pytań, które po jej lekturze mi się nasunęły.

Jest oczywiste, że dokładność pomiaru energii wiązki jest kluczowa dla uzyskania prawidłowego opisu reakcji. Jako fizyk eksperymentator chętnie dowiedziałbym się czy rekonstrukcja torów heli-6 z komór proporcjonalnych mogłaby zostać użyta do korekty długości toru lotu w metodzie Time-of-Flight do wyznaczenia energii? Taka korekta być może zmniejszyłaby szerokość rozkładu energii heli z Rys. 3.6 i może zwiększyłaby statystykę, choć pewnie efekt ten byłby minimalny.

Magister Zalewski podał stosunkowo niewiele szczegółów dotyczących wkładów ilościowych od różnych warunków redukcji danych. Byłoby interesujące zobaczyć rozkład szerokości klastrów w komorze proporcjonalnej, dowiedzieć się jak duży był efekt wielokrotnych klastrów w komorach, czy braku sygnału w fotopowielaczu detektora ToF, które skutkowały usunięciem zdarzenia.

Podobne pytania nasuwają mi się w kontekście detektora krzemowego i scyntylatora NaJ(Tl): rozkład wielkości klastrów, ich ilość i sposób traktowania, przesłuchy między detektorami.

Reasumując, przedstawiona mi do recenzji praca dotyczy pierwszego eksperymentu wykonanego w 2018 roku, na nowo oddanym separatorze izotopów ACCULINNA-2 w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej. Dotyczy problemu o fundamentalnym znaczeniu dla prawidłowego opisu reakcji pomiędzy bardzo lekkimi jądrami, dostarczając nowych danych eksperymentalnych umożliwiających lepsze dopasowanie potencjałów jądrowych do szerszej klasy badanych reakcji. To z kolei może być istotne dla rozumienia procesów odpowiedzialnych za tworzenie się pierwiastków w gwiazdach bądź we wczesnym stadium ewolucji wszechświata. Nie ulega dla mnie wątpliwości, że magister Bogumił Zalewski opanował i osiągnął dużą biegłość w posługiwaniu się metodami pozwalającymi na przygotowanie i przeprowadzenie prawidłowej analizy złożonych eksperymentów z dziedziny fizyki jądrowej. Osiągnął także zamierzone cele, a wyniki zaprezentował w sposób bardzo przekonujący. Biorąc pod uwagę także znaczenie wykonanej analizy oceniam, że praca jest bardzo wartościowa, a Autor spełnia kryteria stawiane kandydatom w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020r. poz 85) oraz wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, w uznaniu zakresu wykonanej pracy, dbałości o szczegóły i wynikającej z niej dobrej jakości rezultatów oraz sposobu ich prezentacji, chciałbym zaproponować Radzie Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego wyróżnienie rozprawy doktorskiej magistra Bogumiła Zalewskiego.

Adam Kowalc

Kraków, 20.05.2024